



**Influence du vieillissement marin sur l'endommagement
en sollicitation hors plan de bordé de bateau de course
= Influence of sea water aging on damage development
in racing boat hull under inplane shear loading.**

Romain Maurin, Christophe Baley, Peter Davies

► **To cite this version:**

Romain Maurin, Christophe Baley, Peter Davies. Influence du vieillissement marin sur l'endommagement en sollicitation hors plan de bordé de bateau de course = Influence of sea water aging on damage development in racing boat hull under inplane shear loading.. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France. 10 p. hal-00385779

HAL Id: hal-00385779

<https://hal.science/hal-00385779>

Submitted on 11 Jun 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Influence du vieillissement marin sur l'endommagement en sollicitation hors plan de bordé de bateau de course

Influence of sea water aging on damage development in racing boat hull under in-plane shear loading.

Romain Maurin¹, Christophe Baley¹ et Peter Davies²

¹ Laboratoire LIMATB

Université de Bretagne Sud, Université Européen de Bretagne, BP 92116, 56321 Lorient cedex

e-mail : romain.maurin@univ-ubs.fr, christophe.baley@univ-ubs.fr

² : Matériaux et Structures

IFREMER, Centre de Brest, BP 70, 29280 Plouzané, France

e-mail : peter.davies@ifremer.fr

Résumé

Nous avons étudié l'influence du vieillissement en eau de mer d'échantillons de stratifiés carbone/époxy provenant de la structure de voilier de course. D'abord, afin d'établir une référence pour la suite de l'étude, les cinétiques de prise de masse d'eau ont été déterminées à 5 températures (4°, 20°, 40°, 60°, 80°C), ainsi que l'influence de l'immersion sur les propriétés mécaniques et sur l'endommagement.

Ensuite différents domaines ont été étudiés : l'incidence de la protection de type peinture et enduit sur la prise de masse, l'évolution des propriétés mécaniques et l'endommagement de plaques issues de la même structure a été étudiée. Nous avons montré que la peinture époxy utilisée pour le revêtement des voiliers présentait des propriétés barrières retardant la diffusion de l'eau et la diminution des propriétés mécaniques. L'influence du nombre de couche de peinture n'est pas négligeable, allant même à légèrement modifier l'endommagement. En complément, une peinture anticorrosion couvrant les quilles des monocoques fut testée, on note que la diminution de propriété ne suit pas la prise de masse. Par ailleurs, des plaques protégées par un enduit ont également été vieilles et analysées.

Abstract

The seawater aging of samples taken from a racing sailing boat structure have been studied. First the diffusion kinetics have been measured at 5 different temperatures, and the influence of seawater on the mechanical properties and damage development has been evaluated. These results serve as a reference for the second part of this study.

Secondly we studied the influence of painting and coating on diffusion, mechanical properties and damage as a function of aging time, using samples from the same structure as the first part of the study. The epoxy paint used on racing boats acts as a water barrier which reduces both the water uptake speed and the mechanical property decrease. The number of coating layers modified the properties and even changes the damage mechanisms. Anticorrosion paint which is used for keel protection did not act as a water barrier, but in this case property degradation is not directly linked to the water uptake. Finally, experiments were performed on a coating used to fill the holes resulting from woven fibre bundles.

Mots Clés : vieillissement, endommagement, sollicitation hors axe, marine

Keywords : aging, damage, off-axis loading, marine

1. Introduction

Les voiliers de course au large (monocoques et multicoques) deviennent de plus en plus performants. Les concepteurs utilisent des matériaux composites hautes performances (fibres de carbone / résine époxy), mais comme le montre des avaries récentes en course, la fiabilité doit être améliorée. On rappelle que les matériaux utilisés pour la construction de bateaux de course sont proches de ceux utilisés en construction aéronautique, mais il existe néanmoins des différences importantes entre les 2 domaines qui limitent actuellement les transferts de connaissances (méthodes de fabrication, suivi de qualité, moyens financiers....).

La réduction de poids est très importante dans le nautisme. L'usage de la technologie du sandwich permis de réduire la masse des structures, mais les peaux de sandwich sont très fines, souvent inférieure au millimètre. Dans ces conditions, la dégradation liée à l'environnement devient non négligeable. Les architectes et les bureaux d'études ont besoin de données sur l'évolution des propriétés au cours du temps pour calculer des coefficients de sécurités réalistes. Des données existent sur le vieillissement des

composites carbone/époxy dans l'eau distillée, cependant elles ne sont pas représentatives du milieu rencontré par les voiliers. De plus, la diffusion de l'eau de mer dans les composites est spécifique [1].

La coque d'un voilier de course est peinte, alors que celle d'un voilier de série en fibres de verre/résine polyester est protégée par un gelcoat. La peinture a, en plus de l'aspect esthétique et commercial, un rôle barrière afin de ralentir la diffusion d'eau dans le composite et par la même occasion la modification des propriétés physico-chimiques. Cependant, elle est perçue par les coureurs comme un apport supplémentaire de poids sur le bateau, d'où leur volonté de limiter le nombre de couches (1 couche sur les bateaux contre 5 couches recommandés par les fabricants de peintures).

Dans ce contexte, notre étude s'intéresse à l'influence du nombre de couches peintures sur le vieillissement de structures réelles. Une sollicitation hors axes fut choisie afin d'étudier l'évolution des propriétés de la matrice et des interfaces. Davies et al ont montré que pour suivre le vieillissement il faut un essai sensible à la matrice et à l'interface fibre/matrice, tel l'essai de cisaillement dans le plan [2]. Nous avons donc suivi l'endommagement par émission acoustique et par l'identification de la loi d'endommagement proposé par Ladeveze [3, 4].

Cinq températures furent choisies pour suivre la cinétique de diffusion d'eau dans les plaques sans protection. Les plaques peintes vieillirent toutes à 60°C. Les peintures choisies sont : 1 couche de peinture époxy comme ce qui est d'usage sur les bateaux et 3 couches de la même peinture ce qui est un compromis entre la réalité et recommandation. En complément, 2 autres systèmes de protections ont été étudiés : une peinture anticorrosion (3 couches de peinture généralement utilisée pour la protection des quilles) et un enduit (enduction des coques dans leur zones présentant des défauts de surfaces).

2. Matériaux et méthodes

Le comportement des composites dépend de nombreux paramètres, dont le procédé de mise en œuvre. Les échantillons testés proviennent de véritables bordés de prototype transocéanique, démontés du bateau suite à un changement de conception de dernière minute. Les plaques ont donc subi le cycle complet de mise en œuvre que subi un voilier de course en construction. Elles sont donc représentatives de l'histoire thermique et de l'échantillonnage de ce type de structure. Les fibres de carbone sont de type hautes résistances, et la matrice, une époxy mise en œuvre sous forme de pré-imprégné à 120°C. La séquence d'empilement est du type $[\pm 45, 0, 90, -45, +45]$, le pli extérieur à $\pm 45^\circ$ est un tissu et les autres plis sont des unidirectionnels. La symétrie se fait par rapport à l'âme, ce qui fait que nos plaques ne sont pas symétriques. Nous ne sommes pas dans le cas de traction pure, mais de la traction flexion couplé. Ce couplage est visible sur les champs de déformations que nous avons mesurés en 3D, mais il sera négligé pour cette étude. Nous avons découpé les plaques à 22.5° par rapport à l'axe du navire (0°) afin de solliciter les peaux hors axes. La structure initiale du navire est de type sandwich, mais seul le comportement des peaux est étudié. La peau intérieure du bordé a servi à faire les plaques sans peinture, la peau extérieure fut peinte. Plusieurs références de peintures utilisées pour la protection des coques furent déposées au pistolet basse pression. Chaque couche mesurait $125\mu\text{m}$ d'épaisseur avant séchage.

ref	température de vieillissement	déscription	référence de la protection	face du bordé
4, 20, 40, 60, 80	4, 20, 40, 60, 80°C	aucune protection		peau intérieure
PE1	60°C	1 couche de peinture époxy	P E (PRIMAIRE EPOXY BI-COMPOSANT) Nautix	peau extérieure
PE3	60°C	3 couches de peinture époxy	P E (PRIMAIRE EPOXY BI-COMPOSANT) Nautix	peau extérieure
PA3	60°C	3 couches de peinture anticorrosion	I A + P A (IMPREGNATION + PROTECTION) Nautix	peau extérieure
enduit	60°C	1 couche d'enduit époxy	Enduit époxy étanche Watertight Nautix	peau extérieure

Tableau 1 Références des plaques

Le vieillissement réalisé en eau de mer naturelle, pompée dans la rade Brest, sur des plaques de $200 \times 200 \text{ mm}^2$. Pour les échantillons non peints servant de références, la cinétique de diffusion fut étudiée à plusieurs températures : 4°C, 20°C, 40°C, 60°C et 80°C. L'étude de l'évolution des propriétés mécaniques a

été réalisée uniquement pour 2 températures (20 °C et 60 °C). Les plaques peintes furent mises à vieillir uniquement en eau de mer à 60 °C. Les cinétiques et l'évolution des propriétés ont été réalisées pour cette température.

Les éprouvettes ont été usinées après sortie d'eau à l'aide d'une fraiseuse commande numérique. Les bords des plaques ne sont pas utilisés pour éviter les effets de bords. Les champs furent polis jusqu'au papier 600.

Les essais ont été réalisés sur une machine de traction INSTRON, avec une cellule de force de 50KN, à une vitesse de 2mm.min⁻¹. Les déformations ont été mesurées par une caméra numérique à effet de champs (ARAMIS system de GOM GmbH). Des essais de traction, statique et de charge-décharge, ont été réalisés afin d'identifier les paramètres d'une loi d'endommagement.

Les essais statiques ont été équipés d'un système d'acquisition d'émission acoustique de type MISTRAS (Euro Physical Acoustic), munis de deux pré-amplificateurs de 40dB et deux capteurs piézoélectriques de type R15. Un nettoyage du signal fut effectué par une localisation linéaire des salves.

La mesure de la température de transition vitreuse a été réalisée par DMA en flexion 3 points encastrés à 1Hz. Le point retenu est le point d'inflexion de la courbe du module d'élasticité. Le pic de tan δ n'a pas été choisi car avec la prise d'eau, ce pic se divise progressivement en deux due à une accélération de la désorption autour de Tg, comme constaté par Chateauminois et al [5]

3. Résultats

3.1 Cinétique de prise d'eau

L'absorption d'eau est le principal phénomène notable après immersion dans l'eau des matériaux organiques. L'eau est absorbée en surface du matériau puis diffuse au sein de la matière. Fick a établi, par analogie au transfert de chaleur, des équations qui régissent le transfert de masse. Les équations sont présentées par Shen et al [6].

Après de 4 mois de vieillissement, nous n'avons pas atteint le plateau de saturation sauf à 80 °C (Fig 1). Néanmoins, en supposant que la masse à saturation est indépendante de la température (environ 3%) on peut estimer les coefficients de diffusion. Les valeurs des coefficients de diffusion sont présentés dans le Tableau 2. La courbe correspondant à la température de 80 °C présente un plateau puis une décroissance, cela signifie que le matériau s'est dégradé et a perdu de la matière. Cette dégradation de la matrice peut entraîner des valeurs de plateau différentes en fonction de la température.

En ce qui concerne les plaques peintes, toutes excepté la plaque avec peinture anticorrosion, ralentit la prise d'eau. Le comportement de cette dernière peut s'expliquer par 2 phénomènes : soit la peinture a dégradé chimiquement la matrice du composite, soit la peinture elle-même absorbe et stocke l'eau.

	4 °C	20 °C	40 °C	60 °C	80 °C	enduite
Dglobal (mm ² s ⁻¹)	4.71E-08	5.88E-08	1.41E-07	6.60E-07	1.00E-06	3.80E-06
Dz (mm ² s ⁻¹)	4.60E-08	5.74E-08	1.38E-07	6.45E-07	9.81E-07	3.58E-06

Tableau 2 Coefficients de diffusion des plaques de références

La plaque enduite semble avoir atteint un plateau et présente un coefficient de diffusion de $3.58 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$. Il est intéressant de noter que le plateau est atteint pour une valeur très faible et permet au composite ainsi protégé de prendre moins de masse à 60 °C que celui qui est non protégé et vieilli à 20°C.

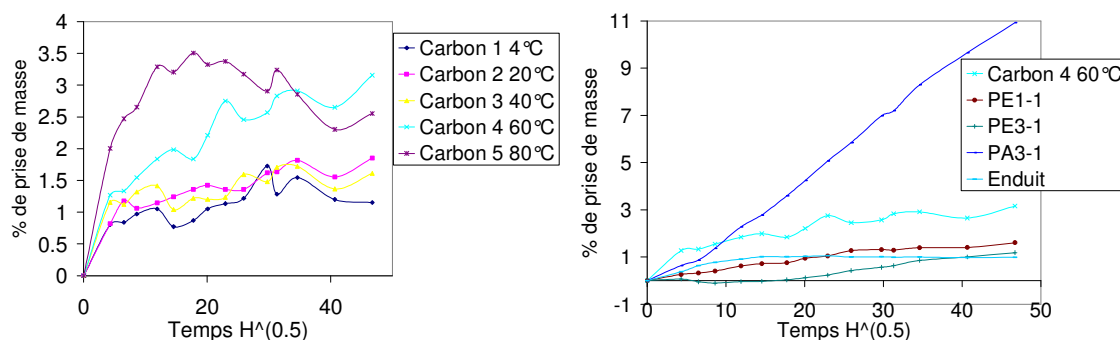


Fig 1 évolution de la masse d'eau dans les composites a) composites de références, b) composites peints

Pour les composites protégés de peinture, les 4 mois n'ont pas été suffisants pour atteindre la saturation. Nous ne pouvons donc pas calculer de coefficient de diffusion. Et comme le montre la plaque protégée de l'enduit, le plateau de saturation n'est pas forcément égale à celui des plaques non peintes. Les

comparaisons se feront donc par lecture graphique. Une couche de peinture époxy semble, ralentir la prise de masse du composite à une vitesse équivalente à celle d'une plaque non protégée à 20 °C. Cette effet ralentisseur est accrue par l'ajout de couches supplémentaires. Cette addition permet de retarder le départ de la prise de masse de 17 jours. Après 70 jours à 60 °C, ce type de protection n'est plus efficace pour limiter la prise d'eau.

3.2 Evolution de la Tg

Les propriétés initiales des deux peaux d'une structure sandwich ne sont pas identiques pour un bordé. Ceci est dû au fait qu'une coque de prototype transocéanique n'est pas réalisée en une seule fois, mais 3-4 étapes [7]. Le plus couramment, les étapes sont :

- Moulage de la peau extérieure
- Collage de l'âme
- Moulage de la peau intérieure

Les deux peaux ne subissent pas exactement le même cycle thermique, ce qui explique une différence constatée sur les Tg de départ. Cette constatation est valable également pour les propriétés mécaniques.

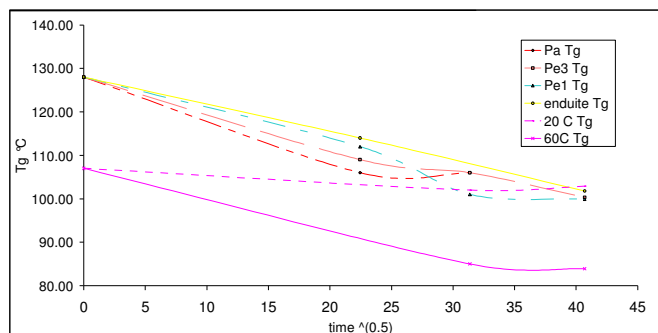


Fig 2 Evolution de la Tg du composite versus temps de vieillissement

L'analyse de l'ensemble des essais de vieillissement montre que la chute de la Tg est fonction de la température des bains. Le type de peinture influence peu ou pas la Tg, mais lors de l'essai de DMA l'eau peut se désorber, comme nous l'avons précisé au paragraphe 2. L'usinage des éprouvettes peut également influencer sur les résultats. C'est l'inconvénient de faire du vieillissement sur des plaques au lieu des éprouvettes.

3.3 Propriétés mécaniques

Pour cette étude, nous avons usiné les éprouvettes d'un angle $\alpha = 22.5^\circ$ par rapport à l'orientation des fibres pour générer une sollicitation hors axes. Cependant, les propriétés n'ont que peu d'intérêt dans ce repère. Après essai, nous avons donc fait retourner le vecteur de déformation ainsi que le vecteur de contrainte. Nous les avons fait repasser du repère de sollicitation au repère des fibres (Équation 1 et Équation 2) afin de calculer, par la loi de Hooke, la matrice de raideur.

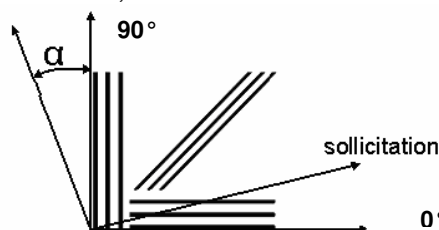


Fig 3 Repère des essais

$$\begin{pmatrix} \sigma_{1s} \\ \sigma_{2s} \\ \sigma_{6s} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos^2 \alpha & \sin^2 \alpha & -2\cos \alpha \sin \alpha \\ \sin^2 \alpha & \cos^2 \alpha & 2\cos \alpha \sin \alpha \\ \cos \alpha \sin \alpha & -\cos \alpha \sin \alpha & \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{1f} \\ \sigma_{2f} \\ \sigma_{6f} \end{pmatrix}$$

Équation 1 Rotation du vecteur contrainte

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{1s} \\ \epsilon_{2s} \\ \epsilon_{6s} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos^2 \alpha & \sin^2 \alpha & -\cos \alpha \sin \alpha \\ \sin^2 \alpha & \cos^2 \alpha & \cos \alpha \sin \alpha \\ 2\cos \alpha \sin \alpha & -2\cos \alpha \sin \alpha & \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_{1f} \\ \epsilon_{2f} \\ \epsilon_{6f} \end{pmatrix}$$

Équation 2 Rotation du vecteur déformation

Après rotation, la matrice est constituée de 3 composantes, suivant X, Y et en cisaillement. Pour le calcul des propriétés, nous avons négligé les propriétés de la peinture. Pour le calcul de la contrainte, l'augmentation de l'épaisseur due aux couches de peinture est négligée également.

3.3.1 Propriétés élastiques

En ce qui concerne l'évolution des paramètres de la matrice de raideur (Q_{xx} , Q_{yy} , Q_{xy}), on constate une perte pour toutes les références suivant X et Y (Fig 4). Cette évolution classique pour les composites est due à une plastification de la matrice [8]. La sollicitation n'est pas réalisée dans l'axe des fibres, mais obtenue par calcul, de plus, le nombre de plis à 0° est faible, ce qui nous laisse penser que l'influence de la matrice n'est pas négligeable. La perte est plus importante pour une température de vieillissement plus élevée. Il est intéressant de noter qu'avec un même changement de repère, les 3 composantes de la matrice ne suivent pas la même évolution. Les fluctuations sont très importantes pour le cisaillement contrairement aux 2 autres directions.

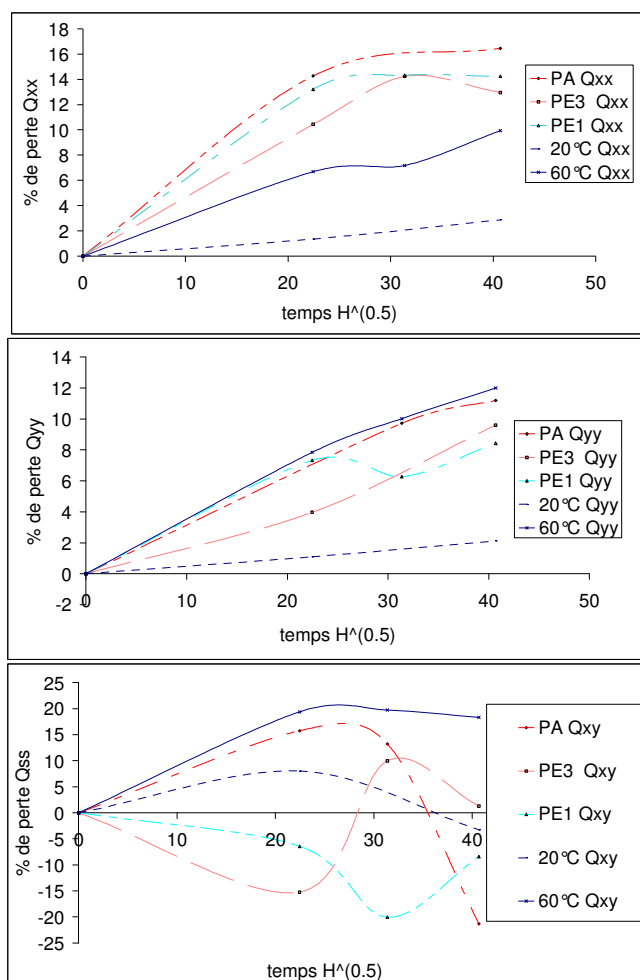


Fig 4 évolution des coefficients de la matrice de raideur a) Q_{xx} , b) Q_{yy} , c) Q_{ss}

Globalement, la perte de raideur est plus importante pour la plaque exposée à de l'eau à 60°C sans protection, sauf pour l'axe X (correspondant à l'axe 0°). La peinture anticorrosion, qui n'est pas spécifique pour les composites, présente une protection très limitée pour la rigidité. Concernant la peinture époxy, il s'agit de la protection est plus importante, cependant, le nombre de couches à une faible influence sur la raideur.

3.3.2 Propriétés à rupture

Contrairement à la raideur, pour une plaque donnée, les composantes du vecteur de contrainte suivent tous la même tendance, quelque soit l'axe étudié (Fig 5). Comme précédemment, la condition d'immersion (température de bain) influence les propriétés à rupture du composite et la peinture ralentit le vieillissement. La plus grande protection est obtenue avec les 3 couches de peintures époxy, suivit de la peinture anticorrosion et de la couche unique de peinture époxy.

L'augmentation de la contrainte à rupture de la plaque enduite est surprenante. Cela s'explique par le dépôt de l'enduit à l'aide d'une spatule, comme dans les chantiers, du fait de sa viscosité. Ce procédé a créé une couche épaisse (proche du millimètre de chaque côté). Cette surépaisseur influence les propriétés de traction, son effet sur les propriétés mécaniques ne peut donc pas être négligé.

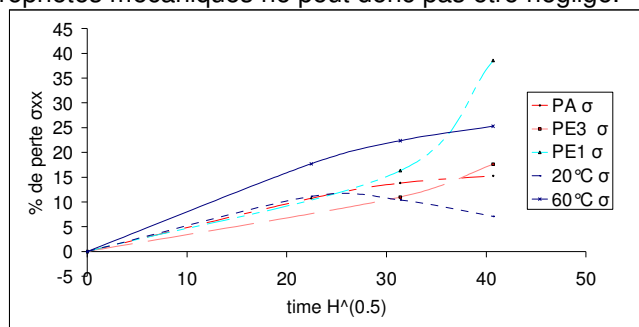


Fig 5 Evolution des coefficients du vecteur contrainte a) σ_{xx} ,

L'évolution des vecteurs de déformation est très différente (Fig 6). La déformation à rupture augmente pour la plaque ayant vieilli à 20°C, alors que c'est l'inverse pour celle vieilli à 60°C.

La plaque présentant la plus grande perte de déformation à rupture est celle peinte avec une couche de peinture époxy. L'ajout de 2 couches supplémentaires de peinture diminue cette perte, la plaçant proche des plaques peintes à la peinture anticorrosion. Cependant la perte de déformation reste toujours supérieure à la plaque non peinte.

Concernant la plaque recouverte d'enduit, son évolution dépend de la composante observée. Suivant l'axe des fibres, la déformation est similaire à une plaque non peinte pour une même température de vieillissement. Pour l'axe transversal on constate une diminution de propriétés équivalentes à celle observé pour 3 couches de peinture époxy ou anticorrosion. Enfin, en cisaillement, la réduction est équivalente à celle d'une plaque peinte avec une couche de peinture époxy.

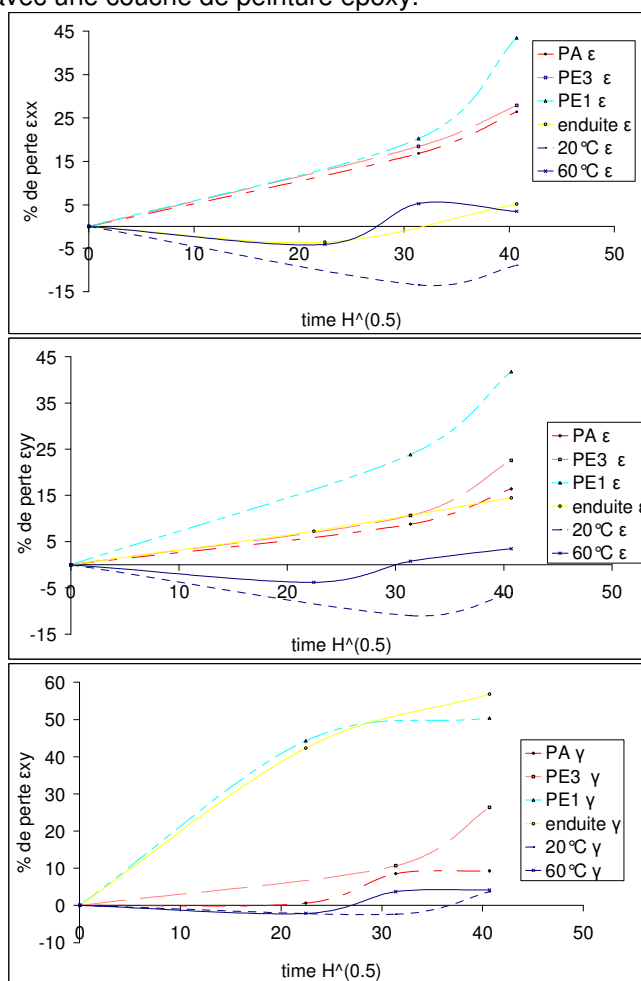


Fig 6 Evolution des coefficients du vecteur déformation a) ϵ_{xx} , b) ϵ_{yy} , c) γ_{ss}

3.4 Endommagement

3.4.1 Emission acoustique

La détermination du seuil d'endommagement est un paramètre intéressant pour le suivi du vieillissement. Par émission acoustique, il correspond à la première salve localisée entre les 2 capteurs. Pour cette étude, cette valeur est définie par une contrainte dans le repère de sollicitation.

Pour nos éprouvettes deux comportements sont constatés : les éprouvettes vieillissant à 20 °C présentent un seuil d'endommagement qui augmente avec le temps d'immersion. Les éprouvettes après vieillissement à 60 °C présentent toutes un seuil d'endommagement plus faible. L'influence de la peinture est également visible sur l'évolution de ce paramètre. Les éprouvettes protégées par une peinture anticorrosion présentent la plus importante diminution, suivi des échantillons possédant une couche de peinture époxy puis les plaques couvertes de 3 couches de peinture époxy

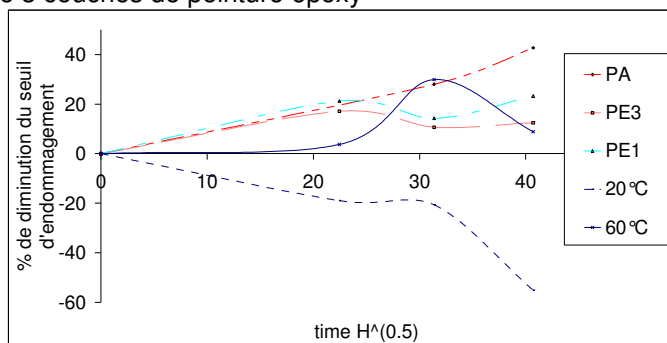


Fig 7 Evolution du seuil d'endommagement

Il faut nuancer la comparaison entre les éprouvettes peintes et non peintes. La diminution du seuil est, en proportion, plus importante pour les éprouvettes protégées, mais la valeur d'origine est également différente. Les plaques n'étant pas issues de la même peau du bordé, leur histoire thermomécanique liée au cycle de production est différente. Il y a peut être un effet kaiser [9]. Les cycles thermiques génèrent des endommagements dans le matériau, or en émission acoustique, une éprouvette endommagée ne générera pas de salve supplémentaire tant que l'état de contrainte n'est pas supérieur à celui qui a créé l'endommagement, c'est l'effet kaiser. Nos plaques venant du même bordé, nous n'avons pas la possibilité de vérifier cette hypothèse.

En ce qui concerne les mécanismes d'endommagement, aucune évolution significative des paramètres d'émission acoustique ne nous permet de déterminer un changement de phénomène au cours du vieillissement à 20 °C comme à 60 °C, cependant, la chronologie est légèrement différente. Les salves d'amplitude moyenne, qui peuvent être attribués à des décohésions arrivent plus tôt durant l'essai [10].

En ce qui concerne les plaques peintes, avant vieillissement, les premiers endommagements se développent dans la matrice et dans un deuxième temps, des décohésions s'ajoutent.

Après vieillissement, le comportement n'est pas identique, les premiers endommagements se développent dans la matrice puis dans un second temps, nous observons uniquement des décohésions.

3.4.2 Identification d'un modèle

Afin de recouper les informations mesurées par émission acoustique, nous avons effectué des cycles de charge/décharge pour identifier les paramètres d'une loi d'endommagement. Nous avons choisi d'utiliser le modèle développé par Ladeveze [3]. Les équations utilisées pour le calcul des différents paramètres ont été présentés par Casari [4]. N'ayant pas la possibilité d'identifier les paramètres sur des éprouvettes renforcée par des fibres unidirectionnels et orienté à $[0^\circ]$, $[\pm 45]$, $[\pm 67.5]$, nous les avons estimés pour nos éprouvettes après rotation des repères. Ces identifications n'ont pas pour but de simuler l'endommagement, mais bien de donner des informations supplémentaires pour le suivi du vieillissement. Nous calculerons deux coefficients de plasticité ainsi que deux coefficients d'endommagement en cisaillement et en traction transverse.

Les termes de plasticité diminuent tous en fonction du temps de vieillissement (Fig 8). Ce phénomène indique donc une accélération de la déformation plastique. Excepté quelques points, les coefficients de plasticité sont proches. Les plaques enduites présentent toujours des différences par rapport aux autres échantillons. Ceci est un exemple supplémentaire qui illustre que l'enduit joue un rôle sur les propriétés mécaniques et ne peut pas être négligé.

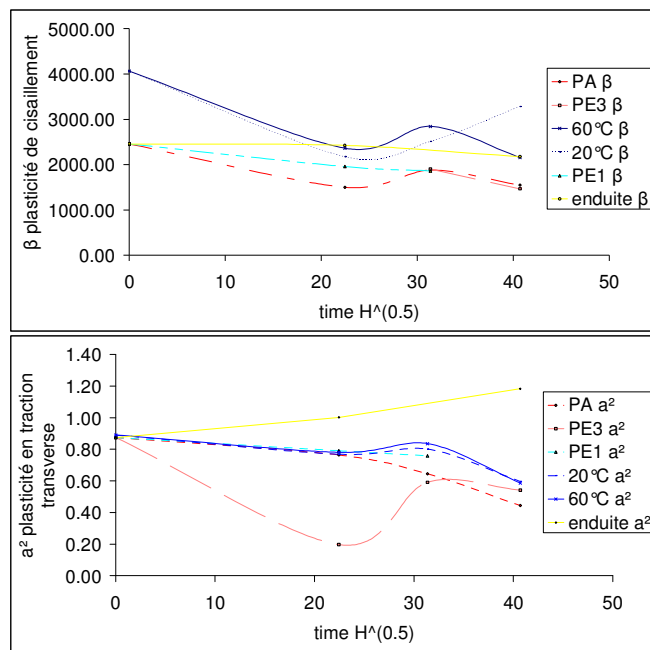


Fig 8 Evolution des coefficients de plasticité a) en cisaillement, paramètre β b) en traction transverse, paramètre a^2

Le coefficient d'endommagement en cisaillement augmente avec le temps de vieillissement (Fig 9a). La comparaison entre les 2 températures montre que celle-ci a un effet accélérateur sur l'endommagement. La peinture influence également la cinétique. Le coefficient le plus faible est celui de la plaque peinte avec la peinture anticorrosion, suivi de celle peinte avec 3 couches d'époxy et enfin la plaque avec une seule couche d'époxy.

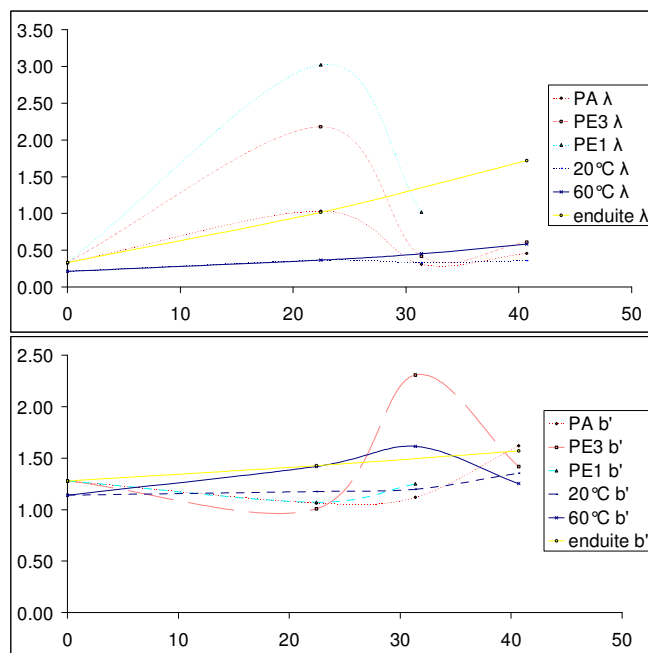


Fig 9 Evolution des coefficients d'endommagement a) en cisaillement b) relation cisaillement/traction transverse

Le paramètre b' qui illustre la relation entre les endommagements en traction transverse et en cisaillement présente une augmentation constante pour les plaques non protégées (Fig 9b), cela signifie que l'importance de l'endommagement en traction transverse croît par rapport à celui de cisaillement. Ce résultat est fonction de la température de bain. Pour les plaques peintes, l'influence du cisaillement augmente au début du vieillissement puis cet effet s'inverse après 1 mois à 60°C.

4 Discussion/conclusion

4.2 Vieillessement de plaques non protégées

La température est un facteur accélérant le vieillissement, nos plaques issues des bordés de bateau de course ne font pas exception. Pour les échantillons non peints (référence pour le suivi du vieillissement), le temps de vieillissement de 4 mois fut trop court pour atteindre la saturation sauf à 80°C. On peut estimer que le facteur d'accélération de la prise d'eau à 80°C est de l'ordre de 17 fois par rapport à 20°C. Cette absorption d'eau crée une plastification de la matrice, visible par une chute de la T_g et des réductions des 3 constantes de raideur (dans l'axe des fibres, transverse et de cisaillement). Comme couramment observé dans la littérature, les propriétés à rupture diminuent avec le temps de vieillissement et l'augmentation de la température des bains. Ce phénomène est généralement expliqué par des dégradations d'interface [11, 12]. L'identification d'une loi d'endommagement en cisaillement indique une accélération avec le temps de vieillissement et la température, tout comme le facteur b' qui fait la relation entre le l'endommagement en transverse et en cisaillement. Ceci est cohérent avec l'apparition plus précoce de décohésions. Si on s'intéresse à la plasticité, bien que ce phénomène soit discutable pour les composites, il apporte tout de même des informations intéressantes. Durant le vieillissement, les termes de plasticité en cisaillement et en traction transverse diminuent, ce qui signifie que la déformation plastique s'accélère. Ce phénomène a été lié à la relaxation β [13] peu influencé par la température de bain.

4.3 Influence de la peinture

4.3.1 Peinture époxy

La peinture époxy est couramment utilisée pour le revêtement des coques de voiliers de course. Elle présente un caractère retardant à la pénétration de l'eau dans le composite notable. Le composite protégé par 3 couches présente même un retard au démarrage de la prise d'eau de 17 jours à 60°C. Ce délai n'est pas visible sur les plaques avec une seule couche. Cela montre l'influence du nombre de couches sur l'effet barrière. Cependant la pénétration d'eau est freinée, comme le montre les courbes d'absorption. Les plaques protégées par 3 couches présentent une barrière pendant 70 jours. Après 90 jours de vieillissement à 60°C, la plaque a absorbé autant d'eau qu'une plaque non protégée à 4°C durant la même période. Malgré cette prise de masse différente, les variations de T_g entre les différentes plaques peintes semblent négligeables. Cette constatation surprenante s'explique sans doute par la préparation des échantillons pour le DMA ou par l'évaporation d'eau durant l'essai. Concernant les propriétés mécaniques, l'effet de la plastification joue un rôle similaire pour les 2 types de protection. Les propriétés à rupture sont également influencées par l'effet barrière. La réduction de contrainte est inférieure pour les plaques protégées avec une couche à température de vieillissement constante. L'ajout de 2 couches de peinture supplémentaires limite fortement cette perte de contrainte. En ce qui concerne les déformations à rupture, on constate une forte perte pour les éprouvettes peintes, elles sont nettement plus importantes que les plaques non peintes. La diminution est globalement identique quelque soit les axes observés pour les plaques peintes avec 3 couches. Les directions les plus influencées du nombre de couches barrières sont principalement le cisaillement et la traction transverse. Ce sont les deux axes qui sollicitent la matrice et reflètent bien le ralentissement de l'endommagement avec l'ajout de couches de peinture.

L'endommagement est influencé par l'épaisseur du revêtement. Le seuil d'endommagement est plus faible pour une plaque peu protégée

4.3.2 Enduit

Une plaque protégée par de l'enduit atteint très vite son palier de saturation (8 jours). Ce palier est très faible, il correspond à une prise de masse de 6 jours à 4°C. Dans notre cas, l'épaisseur est surdimensionnée par rapport à une utilisation normale sur un voilier de course. Industriellement, elle n'est utilisée que localement « pour boucher les trous ». Après 70 jours de vieillissement, la plaque enduite devient la plaque qui a absorbé le moins d'eau. Concernant les propriétés mécaniques, l'évolution est très différente des autres plaques, le revêtement à un effet non négligeable sur les propriétés mécaniques.

4.3.3 Peinture anticorrosion

Sa prise d'eau est anormale et importante. Après 13 jours la plaque est celle qui a absorbé le plus d'eau (plus que la plaque non protégée à 80°C). Cependant, ce phénomène n'influence pas les propriétés mécaniques. Les pertes de rigidité sont supérieures à celles des plaques protégées d'une couche de peinture époxy, mais restent inférieures à celles des plaques non protégées. Concernant les contraintes à rupture, elles se situent entre celles des plaques protégées par une et 3 couches de peinture époxy. Les déformations à rupture sont un peu différentes, leur diminution est inférieure à celles des plaques revêtues de peinture époxy.

Il n'y a pas de relation directe entre l'évolution de la prise de masse et des propriétés mécaniques ou du seuil d'endommagement. L'eau absorbée se trouve stockée en grande partie dans le film de peinture ou à l'interface composite/revêtement. Cette explication est corroborée par une observation expérimentale, lors de certains essais cycliques, une décohésion peinture/composite a été constatée, ce qui engendrait un glissement dans les mors de la machine d'essai. Ce phénomène n'est visible que sur ce type d'échantillon.

5 Remerciements

Nous tenons à remercier M. BARAL de CDK Kéroman technologie de nous avoir fourni les échantillons de prototype transocéanique.

Nous tenons également à remercier M Langlois de Nautix de nous avoir conseillé, fourni et appliqué la peinture de cette étude.

Références

- [1] TS Grant, Seawater degradation of polymeric composites, *MSc thesis, Texas A&M University, May 1991*
- [2] P. Davies, F. Mazeas, P. Casari, Sea Water Aging of Glass Reinforced Composites: Shear Behaviour and Damage Modelling, *Journal of Composite Materials* 2001; 35; 1343
- [3] P. Ladeveze, on a damage mechanics approach, mechanics and mechanisms of damage in composites and multi materials, ESIS11 (ed by D. Batiste), 1991, Mechanical engineering publication, London, 119-141
- [4] P. Casari, Y. H. De Roeck, O. Allix, Damage and scatter behaviour of glass reinforced marine composite materials, ECCM7 proceeding, 1996
- [5] A. Chateauminois, B. Chabert, J. P. Soulier, et L. Vincent, Dynamic Mechanical Analysis of Epoxy Composites Plasticized by Water: Artifact and Reality, *Polymer Composites* 16 (1995), p288-296
- [6] C. H Shen, G.S. Springer, Moisture absorption and desorption of composite materials, *Environmental effect on composite materials*, ed G.S. Springer (1981) p15-33
- [7] N. Baral, Contribution à l'étude des matériaux et structures composites appliquées à la construction de prototypes océaniques. thèse de doctorat, Université de Bretagne Sud (2008)
- [8] R. Maurin, Y. Perrot, A. Bourmaud, P. Davies, C. Baley, Seawater ageing of low styrene emission resins for marine composites: Mechanical behaviour and nano-indentation studies, *Composites: Part A* (2008)
- [9] N-S Choi, T-W Kim, K Y. Rhee, Kaiser effects in acoustic emission from composites during thermal cyclic-loading, *NDT&E International* 38 (2005) 268–274
- [10] D. Scida, Z. Aboura, M.L. Benzeggagh; The effect of ageing on the damage events in woven-fibre composite materials under different loading conditions, *Composites Science and Technology* 62 (2002) 551–557
- [11] F. Pomiès, L. A. Carlsson, J. W. Gillespie, Marine environmental effects on polymer matrix composites, *ASTM STP 1230*, (1995) p283-303
- [12] Y. Perrot, Influence des propriétés de la matrice sur le comportement mécanique de matériaux composites verre/polyester utilisés en construction navale de plaisance - Cas des résines polyester limitant les émissions de styrène, thèse de doctorat, Université de Bretagne Sud (2006)
- [13] P. Zinck, De la caractérisation micromécanique du vieillissement hydrothermique des interphases polyépoxyde fibre de verre au comportement du composite unidirectionnel. Relation entre les échelles micro et macro, thèse de doctorat, Lyon (1999)